

Johanna Riihimäki

**Green Cloud Computing: palvelinkeskusten
energiansäästökeinot hiilijalanjäljen minimoinnin
näkökulmasta**

Tietotekniikan kandidaatintutkielma

3. kesäkuuta 2021

Jyväskylän yliopisto

Informaatioteknologian tiedekunta

Tekijä: Johanna Riihimäki

Yhteystiedot: johanna.p.riihimaki@student.jyu.fi

Ohjaaja: Leevi Annala

Työn nimi: Green Cloud Computing: palvelinkeskusten energiansäästökeinot hiilijalanjäljen minimoinnin näkökulmasta

Title in English: Green Cloud Computing: minimizing data centres' energy consumption and carbon footprint

Työ: Kandidaatintutkielma

Opintosuunta: Tietotekniikka

Sivumäärä: 28+0

Tiivistelmä: Palvelinkeskusten hiilijalanjälki on TVT-sektorin nopeimmin kasvava niiden suuren energiankulutuksen vuoksi. Palvelinkeskusten aiheuttamien negatiivisten ympäristövaikutusten hillitsemiseksi tarvitaan nopeita, radikaaleja tekoja. Tässä tutkielmassa käydään läpi hedelmällisimpiä keinoja palvelinkeskusten energiankulutuksen minimointiin hiilijalanjäljen pienentämisen näkökulmasta. Lisäksi sivutaan lyhyesti muita keinoja pienentää palvelinkeskusten aiheuttamaa ympäristökuormitusta.

Avainsanat: Green Cloud Computing, vihreä pilvilaskenta, palvelinkeskus, energiatehokkuus, hiilijalanjälki

Abstract: Data centres' carbon footprint is growing fast due to their constantly increasing energy consumption. The purpose of this thesis is to look into different, promising energy consumption and carbon footprint minimization methods that can curb the impact data centres have on the climate change.

Keywords: Green Cloud Computing, energy efficiency, data centre, carbon footprint

Sisällys

1	JOHDANTO	1
2	PALVELINKESKUSTEN ENERGIANKULUTUKSEN MINIMOINTIKEINOJA .	3
2.1	Laitteistotaso	4
2.1.1	Jäähdytysjärjestelmä	4
2.1.2	Palvelimet	7
2.1.3	Datan varastointi	8
2.1.4	Nettilaitteisto	9
2.2	Sovellustaso	10
2.2.1	Virtualisointi	10
3	ENERGIANSÄÄSTÖKEINOJEN YHTEISKÄYTTÖ JA OPTIMOINTI	12
4	HIILINEUTRAALIT PALVELINKESKUKSET NYT JA TULEVAISUUDESSA .	15
4.1	Keinoja hiilineutraaliuden tavoitteluun	16
4.1.1	Uusiutuvan energian käyttö	16
4.1.2	Hukkalämmön hyödyntäminen	16
4.1.3	Vedenkäytön tehostaminen	17
4.1.4	Laitteiston uusimisen tarpeen arviointi	18
5	JOHTOPÄÄTÖKSET	20
	LÄHTEET	21

1 Johdanto

Ilmastonmuutos on yksi suurimmista maailmanlaajuisista kriiseistä. Merkittävin osa ilmastomuutosta vauhdittavista kasvihuonekaasuista vapautuu ilmakehään fossiilisia polttoaineita käytettäessä energian tuotantoon. Energian tuotannosta vuonna 2019 fossiilisten polttoaineiden osuus oli hieman yli 84% (BP 2020). Globaaleista hiilidioksidipäästöistä tieto- ja viestintäteknologiasektorin (TVT) osuus on saman verran kuin ilmailualan eli noin 2%. Tästä 2%:sta palvelinkeskusten osuus on 15%. (GeSI 2012.) Palvelinkeskusten hiilijalanjäljen arvioidaan olevan TVT-sektorin nopeimmin kasvava (Avgerinou, Bertoldi ja Castellazzi 2017).

Vuonna 2018 palvelinkeskusten maailmanlaajuisen sähkönkulutuksen arvioitiin olevan 205 TWh eli noin 1% globaalista sähkönkulutuksesta (Masanet ym. 2020). Vertailukohtana mainittakoon, että koko Suomen arvioitu sähkönkulutus samana vuonna oli 87 TWh (Tilastokeskus 2019). Arvioiden mukaan vuoteen 2030 mennessä palvelinkeskusten sähkönkulutus olisi 3-13% globaalista: parhaassa tapauksessa noin 1100 TWh, pahimmassa tapauksessa miltei 8000 TWh (Andrae ja Edler 2015). Tosin, nykyinen kehityskulku huomioon ottaen, on todennäköistä että huomattava osa maailman palvelinkeskuksista pyörisi silloin uusiutuvasti tuotetulla energialla. Kulutetun sähkön määrä ei siinä tapauksessa olisi suoraan verrannollinen hiilijalanjälkeen.

Nykytilanne on kuitenkin toinen: globaalilla tasolla 63.3% sähköä tuotetaan yhä fossiilisilla polttoaineilla (Ritchie 2020). Täten runsaasti sähköä kuluttavien palvelinkeskusten hiilijalanjälki on suuri. Uusiutuvan energian käyttö pienentää hiilijalanjälkeä, mutta sen hyödyntäminen ei kuitenkaan ole aina mahdollista esimerkiksi saatavuusongelmista tai kustannussyistä johtuen. Tämän vuoksi on tärkeää pyrkiä minimoimaan palvelinkeskusten energiankulutusta.

Tämä tutkielma käy läpi keinoja pilvipalveluiden ydinten, eli palvelinkeskusten, hiilijalanjäljen pienentämiseen. Tutkielma toteutettiin kirjallisuuskatsauksena monipuolisia ja ajankohvaisia lähteitä käyttäen. Työn pääkeskittymiskohtana on fyysisen palvelinkeskusinfrastruktuurin sisäisen sähkönkulutuksen minimointi ja siten palvelinkeskuksen hiilijalanjäljen pienentäminen. Nykyisen ilmaston tilan, palvelinkeskusten runsaan energiankulutuksen sekä

pilvipalveluiden kasvavan suosion huomioon ottaen aihe on erittäin ajankohtainen.

Tässä työssä pilvipalveluita käsitellään yleisellä tasolla, vaikkakin tyypillisesti pilvipalvelut jaetaan kolmeen osaan (IaaS, SaaS, PaaS). Työn aiheen kannalta pilvipalveluiden osittelu ei ole olennaista. Pilvipalvelut käsitetään yksinkertaisesti jonkin palvelun, kuten datan varastoinnin, toimittamiseksi netin yli. Vihreät pilvipalvelut -käsitteellä tarkoitetaan ekologisempaa, energiatehokkuuteen sekä ympäristökuormituksen vähentämiseen keskittyvää lähestymistapaa pilvipalveluihin (Balasooriya, Wibowo ja Wells 2016).

Power Usage Effectiveness (PUE) on ISO-standardin mukainen suhdeluku, jolla voidaan mitata palvelinkeskuksen energiatehokkuutta (ISO 30134-2 2016).

$$PUE = \frac{E_{PK}}{E_{IT}}, \quad (1.1)$$

missä E_{PK} = Palvelinkeskuksen energiankulutus (kWh) ja E_{IT} = IT-laitteiston energiankulutus (kWh).

Teoriassa paras arvo minkä PUE voi saada on 1,0 eli kaikki palvelinkeskuksen käyttämä energia menisi puhtaasti IT-laitteiston käyttöön. Tällöin yhtään sähköä ei kuluisi esimerkiksi valaistukseen tai jäähdytyksen. Oikein käytettynä PUE on hyödyllinen työkalu, jonka avulla voidaan kehittää palvelinkeskuksen tehokkuutta. Sillä voidaan mitata muutoksien, kuten palvelinkeskuksen lämpötilan laskun, vaikutusta kokonaisenergiankäytön tehokkuuteen (Cole 2011).

Tutkielman rakenne on seuraavanlainen. Toisessa luvussa käydään läpi palvelinkeskusten sähkönkulutusta ja sen minimointikeinoja laitteisto- ja sovellustasolla. Luvussa kolme käydään läpi edellisessä luvussa esiteltujen menetelmien yhteiskäytön optimointia. Neljännessä luvussa käsitellään hiilineutraaleja palvelinkeskuksia. Viidennessä luvussa käydään lyhyesti läpi johtopäätöksiä.

2 Palvelinkeskusten energiankulutuksen minimointikeinoja

Palvelinkeskuksissa on runsaasti IT-laitteistoa. Käytettäessä laitteisto tuottaa lämpöä, mikä lisää ylikuumentumisen riskiä. Tämän vuoksi palvelinkeskuksissa on jäähdytysjärjestelmä, joka ylläpitää laitteiston toiminnan kannalta optimaalisia olosuhteita säätelämällä lämpötilaa ja ilmankosteutta. Tyypillisen palvelinkeskuksen palvelinsali tai -huone jakautuu palvelinrivien rajaamiin käytäviin. Näissä riveissä palvelimet ovat aseteltuna jonkinlaiseen muodostelmaan, tyypillisesti avoimeen tai suljettuun hyllykköön eli räkkiin. Tyypillinen räkki on kooltaan 42U eli 42 räkkiyksikköä (*eng. rack unit*). EIA-310 dokumentti määrittelee yhden räkkiyksikön (1U) leveydeksi 482,6 mm ja paksuudeksi 44,45 mm (EIA-310, n.d.). Tämän työn puitteissa tyypillisen palvelinkeskuksen voidaan katsoa sisältävän tuhansia servereitä.

Pääsääntöisesti palvelinkeskuksien pyörittäminen tapahtuu vuorokauden, prosessoiden suurina määrinä dataa. Energiankulutuksesta suurin osa menee IT-laitteiston pyörittämiseen ja jäähdytykseen. Erään arvion mukaan 90% palvelinkeskuksen sähkönkulutuksesta menee IT-laitteistolle ja jäähdytysjärjestelmälle (Jing ym. 2013). Keskiarvopalvelinkeskuksen PUE on noin 2,5 (Averginou, Bertoldi ja Castellazzi 2017). Vertailukohtana mainittakoon, että vuonna 2020 Googlen Haminan palvelinkeskuksen PUE oli 1,09. Googlen palvelinkeskuksien keskiarvoinen PUE on puolestaan 1,10. (Google Data Centers 2021.) Tyypillisen palvelinkeskuksen energiatehokkuudessa on siis parantamisen varaa. Googlen palvelinkeskuksien alhainen PUE selittyy esimerkiksi energiatehokkaiden jäähdytysmenetelmien käytöllä. Google on alan edelläkävijä ja etsii aktiivisesti vihreitä ratkaisuja palvelinkeskuksiinsa (Google Sustainability 2012).

Palvelinkeskusten energiankulutuksen tarkastelu on jaettu kahteen alalukuun, joista ensimmäinen käsittelee laitteistotason ja toinen ohjelmistotason toimia. Luvuissa käydään läpi käsiteltävän osa-alueen energiankulutusta sekä energiankulutuksen minimointikeinoja.

2.1 Laitteistotaso

Laitteistotason energiansäästötoimilla tarkoitetaan palvelinkeskusten IT-laitteiston energiankulutuksen minimointikeinoja. Laitteistotason käsittely on jaettu neljään alalukuun: jäähdytysjärjestelmä, palvelimet, datan varastointi sekä nettilaitteisto. Luokittelu pohjautuu analyysiin palvelinkeskusten energiankäytöstä Yhdysvalloissa vuonna 2014 (Shehabi ym. 2016). Sen mukaan energiankulutus jakautui seuraavasti: jäähdytysjärjestelmä (ja power provision system) 43%, palvelimet 43%, datan varastointi 11% ja verkkolaitteet 3%.

2.1.1 Jäähdytysjärjestelmä

Lähes kaikki IT-laitteiston sisään ottama sähköenergia muuntuu lämmöksi. Ylikuumenemisen välttämiseksi tarvitaan jäähdytysjärjestelmiä. (Ebrahimi, Jones ja Fleischer 2014.) Laitteiston toimintavarmuuden parantamiseksi konesalin sisäinen lämpötila tulisi pitää optimaalisissa luvuissa. Palvelinkeskusten operointilämpötilaksi on suositeltu 18-27°C (ASHRAE Guidelines 2012). Optimaalista alemmat lämpötilat eivät puolestaan välttämättä lisää laitteiston luotettavuutta (Pinheiro, Weber ja Barroso 2007).

Jäähdytysjärjestelmät vievät paljon energiaa: optimaalisimmat vain noin 25% koko laitoksen energiankulutuksesta, kun taas tehottomimmat järjestelmät voivat viedä siitä jopa yli 60% (Avgerinou, Bertoldi ja Castellazzi 2017). Haaste tehokkaan jäähdytyksen saavuttamiseksi onkin sen oikeanlainen kohdentaminen. Palvelinkeskuksen sisällä jäähdytystarve ei ole tasaista, sillä palvelimetkaan eivät kuormitu tasaisesti. Palvelinhuoneeseen saattaa esimerkiksi syntyä kuumia pisteitä (*eng. hotspot*), jotka lisäävät ylikuumenemisen riskiä ja siten jäähdytyksen tarvetta. Toisaalta toimettomat palvelimet eivät tarvitse lainkaan jäähdytystä. Jäähdytyksen tarve vaihtelee suuresti myös ulkoisten syiden, kuten ilmastoalueen tai vuodenajan mukaan.

Enemmistö palvelinkeskusten konesaleista jäähdytetään puhaltamalla kylmää ilmaa saliin (Liu ym. 2009). Tällöin konesali jakautuu kuumiin ja kylmiin käytäviin (Ebrahimi, Jones ja Fleischer 2014). Palvelimet ottavat jäähdytykseen tarvitsemansa ilman kylmiltä käytäviltä ja puhaltavat lämpöisen poistoilman kuumille käytäville. Tämä lämmin ilma viedään jäähdytettäväksi CRAC-yksikköön (*Computer Room Air Conditioning*), jossa lämpö siirretään veteen

(Liu ym. 2009). Jäähdytetty ilma puhalletaan yksiköstä takaisin kylmille käytäville, joko lattiatasolta venttiileillä ohjaten (korotetun lattian malli) tai katon diffuusoreista (ei-korotetun lattian malli) (Ebrahimi, Jones ja Fleischer 2014). CRAC-yksikkö on siis vastuussa palvelinhuoneen lämpötilan ja ilmankosteuden kontrolloinnista. CRAC-yksikön energiatehokas suunnittelu on yksi suurimmista ongelmista palvelinkeskuksia rakentaessa ja suunnitellessa. (Ebrahimi, Jones ja Fleischer 2014.)

Jäähdytyksen optimointi ei ole yksinkertainen tehtävä. Optimoinnissa apuna voidaan käyttää apuna numeerista virtausdynamiikkaa eli CFD:tä (*Computational Fluid Dynamics*) mahdollisten ongelmakohtien paikantamiseen. Ongelmia aiheuttavat esimerkiksi ilmavirtojen ylivuototilanteet. Ylivuototilanteessa kuuma ilma vuotaa kylmälle käytävälle, jolloin se kuluu takaisin servereihin aiheuttaen kuumia pisteitä ja kasvattaen ylikuumentumisen riskiä. Näitä jäähdytyksen tehokkuutta jarruttavia ongelmakohtia voidaan yrittää kiertää erilaisilla arkkitehtuurillisilla ratkaisuilla, kuten huoneen korkeutta säätelemällä tai fyysisesti eristämällä kuumat ja kylmät käytävät toisistaan. Täydellinen ilmavirtojen sekoittumisen estäminen on kuitenkin hankalaa. (Ebrahimi, Jones ja Fleischer 2014.) Joskus ilmavirrat pääsevät varotoimista huolimatta sekoittumaan keskenään ja siksi ylikuumentumisen estämiseksi joudutaan jäähdyttämään enemmän kuin oikeasti olisi tarve. Kylmien ja lämpimien ilmavirtojen optimointi onkin keskeisessä osassa jäähdytyksen optimointia (Jing ym. 2013).

Ilmajäähdytys on siis epätarkkaa ja tehotonta, ja siten kallista ja epäekologista. Vanhemmissa palvelinkeskuksissa työlasti ja -tilat ovat olleet pienempiä, joten ilmajäähdytys on riittänyt vastaamaan jäähdytystarpeisiin (Gyarmathy 2020). Monissa nykyaikaisissa palvelinkeskuksissa servereiden työlasti on niin suuri, että CRAC-yksikön teho ei yksinkertaisesti riitä vastaamaan kasvavia jäähdytystarpeita. Siksi on kehitetty vaihtoehtoisia, nykyaikaisten palvelinkeskusten tarpeita paremmin vastaavia jäähdytysmenetelmiä. (Ebrahimi, Jones ja Fleischer 2014.)

Yksi ekologisimmista jäähdytysmenetelmistä on vapaajäähdytys (*eng. free cooling*). Vapaa-jäähdytyksessä hyödynnetään viileän ulkomaailman olosuhteita. Vapaa-jäähdytys sopii ilmastoihin, joissa ulkoilman lämpötila on alle 13°C vähintään neljä kuukautta vuodesta (Radu 2017). Menetelmä on energiatehokas, sillä energiaa ei kulu väliaineen (ilma tai neste) jäähdytykseen. Haittapuolena on toki se, että se toimii vain viileissä ilmastoissa. Esimerkiksi

Googlen Haminaan vuonna 2011 käyttöön otettu palvelinkeskus käyttää merivettä jäähdytykseen (Google Hamina, n.d.). Vapaajäähdytykseen, etenkin ilmapohjaiseen, liittyy omat haasteensa: ulkopuolen olosuhteet (lämpötila ja ilmankosteus) ovat hallitsemattomissa ja saattavat vaihdella suurestikin (Liu ym. 2009; Avgerinou, Bertoldi ja Castellazzi 2017).

Nestejäähdytyksen (*eng. liquid cooling*) sanotaan olevan ympäristöystävällistä, helposti skaalattavaa ja kohdennettua. Nestejäähdytys voidaan jakaa kahteen osaan: upotusjäähdytykseen (*eng. immersion cooling*) sekä suora-sirujäähdytykseen (*eng. direct-to-chip cooling*). Upotusjäähdytyksessä laitteisto upotetaan nesteeseen, joka siirtää komponenttien tuottaman lämmön pois. Upotusjäähdytys on energiatehokasta, mutta siihen investointi on kallista ja työlästä, sillä laitteisto täytyy modifioida nesteeseen upotusta ajatellen. Lisäksi vanhaa infrastruktuuria uudistaessa saatetaan joutua tekemään kalliita rakenteellisia muutoksia. Se on myös ylitehokas jäähdytysjärjestelmä. Suurin osa tyyppillisen palvelinkeskuksen servereistä ei vaadi niin tehokasta jäähdytystä. Toisaalta se säästää tilaa, sillä jäähdytysmenetelmän tehokkuudesta johtuen palvelimet voidaan latoa tiiviimpiin muodostelmiin. Kustannussyistä johtuen menetelmä ei kuitenkaan ole laajamittaisessa käytössä, eikä se tyyppillisessä palvelinkeskuksessa pääsisi oikeuksiinsa. Suora-sirujäähdytys on nestepohjaisista jäähdytysmenetelmistä käytännöllisempi vaihtoehto. Siinä jäähdytykseen käytettävä neste tuodaan esimerkiksi putkilla suoraan prosessorille. Nestepohjaiset jäähdytysjärjestelmät ovat luotettavia, sillä ne pitävät prosessorit optimaalisissa lämpötiloissa kuormituksesta tai ilman lämpötilasta riippumatta. (Villa 2020)

Jo rakennetun jäähdytysjärjestelmän optimointikeinot ovat vähäiset ja jälkikäteen tehdyt muutokset tulevat kalliiksi (Liu ym. 2009). Siksi on tärkeää ottaa jäähdytysjärjestelmä huomioon jo suunnitteluvaiheessa. Myös reaaliaikainen jäähdytyksen optimointi, eli jäähdytyksen kohdentaminen sinne missä sitä tarvitaan, on tärkeää hiilijalanjäljen pienentämisen näkökulmasta, sillä perinteisin menetelmin toteutettu jäähdytys vie huomattavan osan sähkökulutuksesta. Reaaliaikainen data auttaa jäähdytyksen dynaamisessa optimoinnissa (Liu ym. 2009). Perinteinen ilmajäähdytys on kuitenkin vanhentuva teknologia ja palvelinkeskusten tehon kasvaessa onkin kannattavaa tutkia muita, tehokkaampia jäähdytysmahdollisuuksia.

2.1.2 Palvelimet

Tyypillisesti palvelinkeskuksien resursseja varataan maksimikuormituksen mukaan. Tarkoituksena on varmistaa, että käytön huipun (*eng. peak*) aikana resurssit ovat saatavilla. Staatinen resurssien kohdentaminen on kuitenkin haaskaavaista energiatehokkuuden kannalta. (Liu ym. 2009.) Energiatehokkuuden kannalta ongelmia aiheuttaa idlaavien eli työkuormattomien palvelinten energiankulutus. Päällä oleva työkuormaton palvelin voi kuluttaa jopa 60% täyden työkuormituksen kulutukseen verrattuna (Jing ym. 2013). Liun ym. (2009) mukaan tehokkain energiansäästökeino on toimettomien komponenttien (kuten CPU, palvelin tai reititin) sammutus. Sen sanotaan olevan ainoa keino eliminoida työkuormattomien komponenttien energiankulutus. Tähänkin liittyy haasteita. On pidettävä huolta, ettei järjestelmän suorituskyky kärsi. Tulee myös ottaa huomioon, että sammutetun komponentin uudelleenkäynnistäminen vie aikaa. Pahimmassa tapauksessa saattaa käydä niin, että uudelleenkäynnistämisen energiankulutus tekee turhaksi sammutuksesta saadut säästöt. (Liu ym. 2009.)

IT-laitteiston turhan kuormituksen pienentäminen on tärkeää huomioida energiatehokkuutta tavoitellessa. Haamupalvelin-termillä kuvataan palvelimia, jotka käyttävät energiaa tekemättä mitään hyödyllistä. Nämä palvelimet kuluttavat 70-85% siitä sähköstä mitä kuluisi täydellä työkuormalla. (Cole 2011.) Arvioiden mukaan 10-30% palvelinkeskuksien servereistä kuluttavat sähköä ilman että tekisivät mitään hyödyllistä (Kooimey 2011). Koska nämä palvelimet eivät tee mitään hyödyllistä ja kuluttavat silti sähköä, on ne tärkeää tunnistaa ja joko sammuttaa tai mieluummin työllistää paremmin. Työkuormattoman laitteiston sammutus alentaa koko palvelinkeskuksen käyttöastetta eli pienentää resurssien tehokasta hyödyntämistä. (Liu ym. 2009.)

Proessorit eli CPU:t kuluttavat runsaasti sähköä. Servereiden komponenttien optimointiin käytetäänkin enimmäkseen prosessorien toimintaan liittyviä menetelmiä. Proessorit on suunniteltu tehokkuus etusijalla. Suuren sähkönkulutuksen lisäksi ne kuumenevat käytössä. Sähkönkulutusta on kuitenkin mahdollista hillitä laitteistotason toimilla. (Jing ym. 2013.)

Jingin ym. (2013) mukaan moniprosessoriset ja moniytimiset järjestelmät ovat paljon energiatehokkaampia kuin yksiytimiset prosessorit. Suurin osa nykyaikaisista palvelinkeskuksista käyttääkin moniydinproessoreita (Dayarathna, Wen ja Fan 2016). Valitettavasti mo-

niydinprosessorien energiatehokkuuden optimointi on tyypillisesti NP-vaikeaa. Tämän takia joudutaankin tyytymään heuristisiin algoritmeihin tai approksimointialgoritmeihin. (Jing ym. 2013.)

Laitteistotason energiankäytön optimoinnin tehokkaimmiksi osoittautuneita keinoja on DVFS (Dynamic Voltage Frequency Scaling) sekä DPM (Dynamic Power Management) (Radu 2017). DPM-menetelmällä pyritään säästämään energiaa sammuttamalla mikropiirin osia (Jing ym. 2013). DVFS toimii siten, että säädellään syöttöjännitettä ja kellotaajuutta työkuorman raskauden mukaan. Näiden voidaan minimoida komponentin energiankulutus tapauskohtaisesti. Näiden sanotaan olevan tehokkaita keinoja pienentää energiankulutusta kun työkuorma on kevyempi. (Liu ym. 2009.) Erään tutkimuksen mukaan DVFS:llä voi saada kohtalaisia energiankulutuksen säästöjä, jopa 25%:iin asti (Fan, Weber ja Barroso 2007). Toisaalta, energiansäästötoimien keskinäinen optimointi on hankalaa ja joissain tapauksissa säästötoimista mahdollisesti saatavat hyödyt valuvat hukkaan epäonnistuneen optimoinnin vuoksi (Liu ym. 2009).

2.1.3 Datan varastointi

Viime vuosina datan varastoinnin tarve on kasvanut ja tulee kasvamaan jatkossakin. Datan varastointiin kuluu huomattava osa palvelinkeskuksien energiankäytöstä. (Jing ym. 2013.) Palvelinkeskuksissa data varastoidaan tiedostopalvelimille (*eng. storage server*), pääasiassa kiintolevyille. Datan varastoinnin energiankäyttöä voidaan optimoida esimerkiksi sammuttamalla suuriakin osioita muistista (Liu ym. 2009).

Artikkelissaan Jing ym. (2013) jakoivat datan varastointiin kuluvan energian minimointikeinot kolmeen alaryhmään: laitteistotason keinoihin, datan sijoittelun hallintakeinoihin sekä välimuistin käyttöön pohjautuviin keinoihin. Laitteiston hallintaan perustuvat ratkaisut esittelevät uudenlaisen muistihierarkian, jossa saavutetaan tasapaino suorituskyvyn ja virrankulutuksen välillä. Keinoja tasapainon saavuttamiseksi ovat esimerkiksi korkea- ja matalasuorituskykyisten kiintolevyjen yhteiskäyttö sekä DVFS:ään verrattava kiintolevyn suoritusnopeutta työlastin mukaan säätelevä DRPM (Dynamic Rotations Per Minute). Datan sijoittelun hallintaan liittyvät ratkaisuehdotukset tuovat uuden hallintakerroksen tiedostojärjestelmän

ylle. Yksi käytetyistä keinoista on sijoitella data levyille sen ”suosion” perusteella: sijoitetaan usein haetut tiedostot eri kiintolevyille kuin harvemmin haetut. Näin harvemmin haettujen tiedostojen levyn virrankulutus voidaan minimoida laskemalla sen pyörimisnopeutta. Kolmantena alaryhmänä esiteltiin välimuistin käyttöön pohjautuvia keinoja. Monissa moderneissa tallennusjärjestelmissä hyödynnetään välimuistia parantamaan suorituskykyä. Välimuistin käyttöä ohjaavat algoritmit sallivat tallennusjärjestelmän osioihin kohdistuva työkuormituksen poistamisen, näin sallien näin niiden virtatilan alentamisen. (Jing ym. 2013)

2.1.4 Nettilaitteisto

Palvelinkeskuksissa tietoverkko (*eng. network*) on kriittinen osa palvelinkeskuksen infrastruktuuria. Tietoverkko mahdollistaa palvelinkeskuksen toiminnalle oleellisten komponenttien keskinäisen kommunikoinnin. Palvelinkeskusten verkkolaitteisto, kuten reitittimet, on yleensä allokoitu selviytymään maksimityökuormista. Kuten servereiden, ei nettilaitteistoonkaan kuormitus ole tasaista. Tyypillisesti ne operoivat paljon maksimityökuormaa kevyemmillä kuormituksilla. Reititin voi kuitenkin kuluttaa jopa 80-90% maksimaalisesta energiankulutuksestaan toimettona eli silloin kun se ei välitä paketteja. (Dayarathna, Wen ja Fan 2016.) Myös Jing ym. (2013) tunnistavat nämä ominaisuudet ja identifioivat kolme eri energiansäästömenetelmää nettilaitteiston tasolla.

Näistä ensimmäinen on NTC (*Network Traffic Consolidation*), joka perustuu tietoliikenteen keskittämiseen pienemmälle osalle verkkolaitteistoa. Tällöin osa verkkolaitteistosta, kuten kytkimet, operoi suuremmilla työkuormilla, osa jää työkuormattomiksi. Kuormattomiksi jääneet verkkolaitteistokomponentit voidaan sammuttaa energiankulutuksen säästämiseksi. Toinen tapa on SLC (*Server Load Consolidation*), jonka ideana puolestaan on keskittää työkuorma pienemmälle määrälle servereitä. Tämä vähentää nettilaitteiston tarvetta, ja työkuormattomiksi jääneet voidaan sammuttaa. Kolmas lähestymistapa on dynaaminen yhteyksien nopeuksien säätely eli LSA (*Link State Adaptation*). Tämä perustuu siihen, että Ethernetin virrankulutus on verrannollinen datansiirtonopeuteen, muttei yhteyden käyttöasteeseen. Nopea datansiirto vie enemmän virtaa hitaaseen verrattuna. (Jing ym. 2013.) Tutkimusten perusteella LSA:n avulla on mahdollista saavuttaa 16% virransäästöt nettilaitteistotasolla ilman suorituskyvyn merkittävää heikkenemistä. NTC:n ja SLC:n avulla on mahdollista saavuttaa

huomattavasti paremmat virransäästöt (jopa 75%), mutta tällöin suorituskyky kärsii. (Mahadevan ym. 2009.)

2.2 Sovellustaso

Palvelinkeskuksen kokonaisenergiankulutuksesta valtaosa osa kuluu IT-laitteiston operointiin. Sovellustason energiankulutuksen minimointikeinoista lupaavin on virtualisointi. Virtualisointi on saanut paljon kannatusta niin akateemisessa maailmassa kuin teollisuudessa (Jing ym. 2013).

2.2.1 Virtualisointi

Virtualisoinnin toimintaperiaate on yksinkertainen. Virtuaalikonemonitori (*eng. hypervisor*) on ohjelmisto, joka jakaa laitteiston fyysiset resurssit virtuaaliympäristöjen käyttöön. (Red Hat, n.d.) Palvelinkeskusten yhteydessä virtualisointi tarkoittaa, että yhdellä fyysisellä palvelimella voi pyöriä useampia virtuaalisia servereitä (Motochi ym. 2017). Ideana on keskittää työlasteja ja sammuttaa työttömiksi jääneet palvelimet virran säästämiseksi (Jing ym. 2013). Servereiden virtualisointi on suosittua palvelinkeskuksissa, sillä se tarjoaa helpon mekanismin monille eri applikaatiolle pyöriä eristyksissä yhdellä fyysisellä palvelimella (Motochi ym. 2017). Lisäksi virtuaaliympäristöjen, eli virtuaalikoneiden, siirtely palvelimelta toiselle on helppoa. Myös verkkolaitteiston virtualisointi on mahdollista ja vähentää tarvittavan fyysisen laitteiston määrää. (Red Hat, n.d.)

Tutkimusten mukaan, virtualisointi palvelinkeskuksissa on huomattavan tehokas energiansäästökeino, jonka avulla on mahdollista pyrkiä kohti pienempää hiilijalanjälkeä ilman että vahingoitetaan palvelinkeskuksen toiminnallisuutta (Motochi ym. 2017). Motochi ym. (2017) totesivat, että virtuaalikoneita pyörittävä palvelin kuluttaa vain hieman enemmän sähköä kuin tavallinen palvelin (tutkittavia virtuaalikoneita kaksi: Xen 3.0.3 ja KVM 83). Perinteinen fyysinen palvelin kulutti 62.8W. Palvelin, jolla pyöri Xen-virtuaalikone kulutti 63.0W (2 aktiivista VM:ää) ja 63.1W (3 aktiivista VM:ää), kun taas KVM-palvelin kulutti 68.8W (2 aktiivista VM:ää) ja 70.1W (3 aktiivista VM:ää). Valitulla virtuaalikoneella on yllättävän paljon merkitystä energiatehokkuuden kannalta. Sen sijaan palvelimella pyörivien virtuaali-

koneiden määrällä ei ollut suurta merkitystä sähkönkulutukseen.

Virtualisointi on avainasemassa kun puhutaan palvelinkeskusten energiankulutuksen minimoinnista. Se on vahva keino palvelinkeskusten hiilijalanjäljen pienentämiseksi ja siten ilmastomuutoksen hillitsemiseksi. (Motochi ym. 2017; Jing ym. 2013.) Optimoinnin tärkeyttä ei tule unohtaa. Tavallisten palvelinten muuttaminen sokeana virtuaalipalvelimiksi ei ole ratkaisu. Optimaalisen energiantehokkuuden saavuttamiseksi palvelimia virtualisoidessa on otettava huomioon erinäisiä seikkoja, kuten virtuaalikoneiden keskinäisen kommunikoinnin tarve.

3 Energiansäästökeinojen yhteiskäyttö ja optimointi

Yksittäiset laitteisto- ja sovellustason energiansäästömenetelmät eivät riitä palvelinkeskusten energiatehokkuuden saavuttamiseen. Maksimaalisen energiatehokkuuden saavuttaminen vaatii optimointia. (Liu ym. 2009.) Kuten edellisessä luvussa tuli ilmi, palvelinkeskusten energiankulutus on monien eri asioiden summa ja energiankulutuksen minimointiin on lukuisia menetelmiä. Keinojen yhteensovittaminen ja optimointi ei kuitenkaan ole yksinkertaista vaan se vaatii kompromisseja. On pidettävä mielessä, että pilvipalveluiden suosio pohjautuu pitkälti niiden edullisuuteen, helppouteen ja luotettavuuteen. Siksi energiankulutuksen minimointi on tehtävä siten, ettei käytettävyys kärsi liikaa tai kustannukset nouse holtittomasti. Palvelinkeskusten resurssien hallintamekanismien tulee olla joustavia (Liu ym. 2009).

Kuten johdannossa mainittiin, PUE on hyödyllinen työkalu mittaamaan infrastruktuuriin tehtyjä muutoksien vaikutusta kokonaisenergiatehokkuuteen (Cole 2011). Mittaamisen tulisi kuitenkin olla jatkuvaa pidemmällä aikavälillä. Muuten ei välttämättä saada oikeellisia, kokonaistilannetta kuvaavia tuloksia (Google Sustainability 2012). PUE:a ei myöskään tulisi käyttää eri palvelinkeskusten keskinäiseen vertailuun tai sellaisenaan kontekstista irrallaan (ISO 30134-2 2016). Ei myöskään tulisi pyrkiä puhtaasti PUE-lukuarvon optimointiin sillä se saattaa johtaa kokonaisenergiankulutuksen kasvuun (Cole 2011). Täytyy muistaa, että PUE ei ole ympäristöystävällisyyden mittari ja että alhainen PUE-tulos ei välttämättä tarkoita alhaista kokonaisenergiankäyttöä. Se ei myöskään ota huomioon uusiutuvasti tuotettua sähköä tai sivutuotteiden, kuten hukkalämmön, uudelleenkäyttöä (ISO 30134-2 2016).

Liun ym. (2009) mukaan palvelinkeskukset ovat monimutkaisia kyber-fyysisiä kokonaisuuksia. Niiden energiankulutuksen minimoinnissa on otettava huomioon monia eri asioita. On muistettava, että palvelinkeskusten työkuorma ei ole tasaista, joten optimoinnin on oltava joustavaa ja pystyttävä reagoimaan muutoksiin nopeasti. Resurssien allokoinnin on oltava dynaamista, ei staattista. Koska palvelinten työkuorma vaihtelee, niin tekee myös jäähdytyksen tarve.

Lämmönhallinta (*eng. thermal management*) on tärkeää palvelinkeskusten optimaalisen operoinnin kannalta. Lämmönhallintaa voidaan toteuttaa esimerkiksi optimoimalla kylmän ja

kuuman ilman virtausta muuttamalla palvelinkeskuksen pohjapiirustusta (eli uudelleenjärjestämällä palvelinkeskuksen laitteistoa) tai palvelinkeskuksen rakennusvaiheessa suosimalla sijainteja, joissa pystytään hyödyntämään vapaajäähdytystä. (Radu 2017.) Tämä kaikki tulisi kuitenkin ottaa huomioon jo suunnitteluvaiheessa sillä jälkikäteen tehdyt muutokset ovat usein kalliita toteuttaa.

Ahmad ja Vijaykumar (2010) puolestaan tuovat esille yksipuolisen optimoinnin haitat. Työkuormien keskittäminen valituille servereille niiden maksimikapasiteetin mukaan mahdollistaa kuormittamattomien servereiden sammuttamisen, mikä säästää energiaa. Tämä kuitenkin nostaa jäähdytyksen tarvetta (ja siten energiankulutusta), sillä aktiiviset palvelimet aiheuttavat kuumia pisteitä. Heidän mukaansa jäähdytyksen liiallinen optimointi taas tuo mukanaan työkuormattoman laitteiston virrankulutuksen. Tutkimuksissa optimoitiin yllä mainitut tekemällä kompromissi työkuorman keskittämisen ja jäähdytyksen optimoinnissa sekä luomalla ylitarjontaa (*eng. over provisioning*) servereistä kasvavan työkuormituksen varalta. Näillä toimilla saavutettiin 30% säästöt kokonaisvirrankulutukseen, ilman että servereiden vasteaika kärsi merkittävästi. (Ahmad ja Vijaykumar 2010)

Liun ym. (2009) mukaan resurssien allokointi yli maksimikapasiteetin (*eng. oversubscription*) on avainasemassa palvelinkeskuksien kykyjen maksimaaliseen hyödyntämiseen. Resurssien ylliallokoinnissa luotetaan siihen, etteivät asiakkaat käytä kaikkia myytyjä resursseja. Kysynnän kasvaessa, palvelinkeskuksen on kuitenkin voitava vastata kysyntään kasvattamalla resursseja, kuten laskentatehoa tai jäähdytystä, jotta palvelun tarjonnan laatu ei kärsisi. Kysynnän laskiessa vapautuneet resurssit on siirrettävä dynaamisesti muuhun käyttöön. (Liu ym. 2009)

Jing ym. (2013) jakavat pilvipalveluiden energiatehokkuuden tavoittelemisen kolmeen askeleeseen. Staattinen servereiden allokointi saattaa johtaa epätehokkaaseen energiankäyttöön, sillä servereiden kuormitus vaihtelee ajanhetkestä riippuen. Siksi he suosittelivat allokointiin dynaamista menetelmää, perustuen nykyaikaiseen suoritukseen sekä tulevaisuuden työkuorman ennakkointiin. Tämä jakautuu kahteen osaan: ensimmäisenä huomioidaan laitteistotasoa, sitten ohjelmistotasoa. Laitteistotasolla energiankulutusta hillitään DVFS:llä, skaalaten fyysisiä resursseja työkuorman mukaan. Ohjelmistotasolla huolehditaan virtualisoinnin avulla yksittäisen sovelluksen (tai palvelun) resursseista. Samalla kontrolloidaan virtuaalikoneiden

kesken allokoituja resursseja.

Edellinen ottaa huomioon energiankulutuksen optimoinnin vain yksittäisen palvelimen kannalta. Koko palvelinkeskuksen näkökulmasta on huomioitava työlastin energiatehokas painottaminen lämpötietoisesti (*eng. thermal-aware energy efficient load balancing*). Tämä ottaa huomioon myös jäähdytyksen. Esimerkiksi tyypillisessä ilmajäähdytteisessä palvelinkeskuksessa viileä ilma kulkeutuu parhaiten palvelimiin keskellä serveririvistöä. Tästä syystä keskellä rivejä sijaitsevat laitteistot pysyvät viileämpinä kuin laitojen laitteisto ja täten niiden riski ylikuumentua on pienempi. Tämän perusteella suuret työkuormat kannattaisi sijoittaa rivistön keskipaikoille. Servereiden tasainen kuormitus ei siis ole optimaalisin ratkaisu vaan työkuormat kannattaa jakaa lämpötietoisesti. Tämä menetelmä on tehokas kun servereiden työlastit ovat suuria. (Jing ym. 2013.) Jäähdytystä ei siis viedä työkuorman luo vaan työkuorma jäähdytyksen luo.

Työlastien ollessa pieniä, virtuaalikoneiden yhteensovittaminen kokonaisvaltaisen energiankulutuksen kannalta (*eng. efficient consolidation of VMs considering overall energy*) on hyödyllinen energiansäästömenetelmä. Perusideana on keskittää työlasti palvelimien osajoukolle verkon topologia huomioon ottaen. Näin ollen voidaan sammuttaa toimetomien servereiden lisäksi myös toimeton verkkolaitteisto. Tässä menetelmässä huomioidaan siis myös virtuaalikoneiden keskinäinen sijainti: joskus niiden on tarpeellista kommunikoida keskenään ja siksi olisi hyvä että ne sijaitsevat fyysisesti lähekkäin. Muuten datan välittäminen niiden välillä tulee kalliiksi koska, nettilaitteisto saattaa käyttää huomattavia määriä sähköä alhaisillakin työlasteilla. Tilannetta tulee katsoa kahdesta näkökulmasta: on huomioitava fyysisen laitteiston väliset suhteet sekä virtuaalikoneiden väliset suhteet. (Jing ym. 2013)

4 Hiilineutraalit palvelinkeskukset nyt ja tulevaisuudessa

Pariisin ilmastopöytäkirja solmittiin vuoden 2015 lopulla. Sopimuksen tavoitteena on rajoittaa maapallon lämpötilan nousu reilusti alle 2 asteen suhteessa esiteolliseen aikaan. (Paris Agreement 2015.) Hiilineutraaliuden tavoittelu on oleellinen osa tämän saavuttamista. Hiilineutraalius tarkoittaa, että ilmakehään ei vapauteta enempää hiilidioksidia kuin mitä maailman hiilinielut pystyvät sitomaan. Sanna Marinin hallitusohjelma tavoittelee hiilineutraalia Suomea vuoteen 2035 mennessä (Valtioneuvosto 2019). Hiilineutraaliuden saavuttamisen keinoihin kuuluu esimerkiksi lähes päästötön sähkön- ja lämmöntuotanto 2030-luvun loppuun mennessä sekä rakentamisen hiilijalanjäljen pienentäminen. Hallitusohjelman linjauksen hiilineutraaliuden saavuttamiseksi ympäristöhaittojen verotusta korostetaan.

Hiilineutraaliustavoitteet ajavat myös palvelinkeskuksia siirtymään kohti hiilineutraaliutta. Hiilineutraalilla palvelinkeskukseksi tarkoitetaan palvelinkeskusta, jonka nettohiilijalanjälki on nolla. Hiilineutraalien palvelinkeskusten saavuttamista on edistämässä erilaisia vapaaehtoisuuteen pohjautuvia sertifikaatteja, konsortioita ja sitoumuksia. CEEDA (*Certification of Energy Efficiency for Data Centers*) on viitekehys, joka antaa sertifioidun arvion palvelinkeskuksen energiatehokkuudesta (CEEDA 2019). Green Grid on voittoa tavoittelematon konsortio, tavoitteenaan palvelinkeskusten resurssitehokkuuden parantaminen (The Green Grid 2021). Kenties merkittävin (myös vapaaehtoisuuteen pohjautuva) sitoumus on Climate Neutral Data Center Pact, johon on sitoutunut merkittäviä eurooppalaisia pilvi- ja palvelinkeskustoimijoita, kuten AWS, Google ja Equinix. Tämä Euroopan vihreän kehityksen ohjelmaa mukaileva, itseään säätelevä sopimusaloite sitouttaa allekirjoittaneet osapuolet saavuttamaan hiilineutraaliuden vuoteen 2030 mennessä. Sopimukseen sisältyy muun muassa seuraavat tavoitteet: tehokkaampi energiankäyttö, uusiutuvan energian käyttöön siirtyminen, tehokkaampi vedenkäyttö jäähdytysjärjestelmissä, servereiden korjaus ja kierrätys sekä hukkalämmön hyödyntäminen. Lupauksiin kuuluu myös PUE:n käyttö, sekä uuden, korvaavan mittarin luominen vanhentuneen PUE:n tilalle. (Judge 2021.)

On siis olemassa tahoja, jotka pyrkivät pienentämään pilvipalveluiden ja palvelinkeskusten aiheuttamaa ympäristöjälkeä. Toistaiseksi kuitenkin kaikki perustuu vapaaehtoisuuteen. Globaalilla mittakaavalla hiilineutraaliuden saavuttaminen pilvipalveluissa on kuitenkin hanka-

laa. Avainasemassa on uusiutuvalla energialla tuotetun sähkön käytön yleistymisen sekä resurssien tehokas käyttäminen.

4.1 Keinoja hiilineutraaliuden tavoitteluun

4.1.1 Uusiutuvan energian käyttö

Käytetyn energian tuotantotavat vaikuttavat hiilijalanjälkeen. Hiilineutraaliuden saavuttamiseen kannalta olisi tärkeää siirtyä käyttämään uusiutuvasti tuotettua energiaa. Esimerkiksi Islannissa kaikki sähkö on uusiutuvasti tuotettua, joten siellä toimivat palvelinkeskukset käyttävät uusiutuvaa energiaa. Uusiutuvaa sähköä ei kuitenkaan ole aina saatavilla tai se saattaa olla merkittävästi kalliimpaa kuin fossiililla polttoaineilla tuotettu sähkö. Varteenotettavana vaihtoehtona yrityksille on tuottaa itse uusiutuvasti sähköä paikan päällä. Tähän on viime aikoina syntynyt enemmän kiinnostusta ja yritykset ovatkin rakentaneet omia uusiutuvaa energiaa tuottavia voimaloita (Berral ym. 2014; Citadel, n.d.). Tutkimusten mukaan toteuttaminen on mahdollista ilman, että se on merkittävästi kalliimpaa muihin energianhankintakeinoihin nähden (Berral ym. 2014).

4.1.2 Hukkalämmön hyödyntäminen

Palvelinkeskukset tuottavat runsaasti lämpöä, jonka poistamiseen kuluu suuria määriä energiaa. Tämän niin sanotun hukkalämmön hyödyntäminen on toistaiseksi vähäistä, mutta kiinnostus sitä kohtaan on nousemassa. Etenkin kaukolämpökäyttöön palvelinkeskusten hukkalämmön hyödyntäminen on erityisen sopivaa (Ebrahimi, Jones ja Fleischer 2014). Esimerkiksi Suomessa on jo hyödynnetty palvelinkeskusten hukkalämpöä tähän käyttöön. Mäntsälässä 75% keskustan kaukolämmöstä on peräisin Yandexin palvelinkeskuksesta, mikä taas on vähentänyt maakaasun tarvetta lämmön tuottamiseen (Nivos 2019). Telia ja energiayhtiö Helen puolestaan ovat sopineet, että Telian Pitäjänmäen palvelinkeskus liitettäisiin kaukolämpöverkkoon. Vuoden 2022 kesäkuussa alkava yhteistyötoiminta lämmittäisi parhaimmillaan yli 20 000 kotia. (Helen 2021.)

Haasteita hukkalämmön uudelleenkäyttöön tuo sen matala laatu eli matala lämpötila (Ebrahimi, Jones ja Fleischer 2014). Myös matalalaatuisen hukkalämmön uudelleenkäyttö on kui-

tenkin mahdollista. Ilmajäähdytteisen palvelinkeskuksen CRAC-yksikön sisään tulevan ilman lämpötila on 35-40°C, mikä riittää hyvin hukkalämmön uudelleenkäyttöön esimerkiksi kaukolämpökäytössä. Vielä paremmin kaukolämpökäyttöön sopii nestepohjaisesta jäähdytyksestä saatava, noin 50-60° asteinen hukkalämpö. (Ebrahimi, Jones ja Fleischer 2014.) Hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpökäytössä vaatii luonnollisesti olemassa olevan kaukolämpöverkoston, joten hukkalämmön hyödyntäminen kaukolämpökäyttöön on paikkasidonnaista.

Palvelinkeskusten tuottamaa lämpöä voidaan myös hyödyntää lämpövoimalaitosten vedenlämmitykseen, täten vähentäen fossiilisten polttoaineiden käyttöä ja pienentäen ympäristövaikutuksia. Menetelmään soveltuvan hukkalämmön on kuitenkin oltava korkealaatuista. Se ei siis sovi ilmajäähdytyksellä tuotetun hukkalämmön hyödyntämiseen. Palvelinkeskuksen tulee myös sijaita lähellä voimalaitosta, mikä tietenkin rajoittaa menetelmän käytettävyyttä. (Ebrahimi, Jones ja Fleischer 2014)

Ebrahimi, Jones ja Fleischer (2014) esittelivät myös monia muita menetelmiä hukkalämmön hyödyntämiseksi. Ei kuitenkaan esitellä niitä tässä laajemmin. Oleellista on, että palvelinkeskusten tuottaman hukkalämmön uudelleenkäyttö on mahdollista. Hukkalämmön uudelleenkäytön mahdollisuuksia rajoittaa sen lämpötila sekä palvelinkeskuksen sijainti. Palvelinkeskusten hukkalämmön kierrätyksellä voidaan kuitenkin saada hyviä tuloksia hiilijalanjäljen pienentämisen näkökulmasta, etenkin jos palvelinkeskusten käyttämä energia on tuotettu uusiutuvasti. Yritystoiminnan kannalta hukkalämmön uudelleenkäyttöön kannustaa siitä saatava taloudellinen hyöty, sillä yritys saa lisätuloja hukkalämmön myymisestä. Hukkalämpöä on myös mahdollista hyödyntää palvelinkeskusten omiin lämmitystarpeisiinsa, mikä puolestaan alentaa niiden operointikustannuksia.

4.1.3 Vedenkäytön tehostaminen

Palvelinkeskukset kuluttavat paljon vettä. Tämä ei ole ideaalista, sillä vesi on tärkeä resurssi, josta on monilla alueilla pulaa jo nyt. Ennusteiden mukaan noin puolet maapallon väestöstä tulee asumaan alueilla, joilla veden kysyntä on suurempaa kuin tarjonta vuoteen 2030 mennessä (United Nations, n.d.).

Palvelinkeskusten vedenkäyttö voidaan jakaa suoraan ja epäsuoraan kulutukseen. Palvelinkeskusten suora vedenkulutus menee pääosin jäähdytysjärjestelmän käyttöön. Epäsuorasti vettä kuluu palvelinkeskusten käyttämän energian tuottamiseen. Esimerkiksi Yhdysvalloissa lämpövoimalaitokset tuottavat noin 90% kaikesta sähköstä. Näissä voimaloissa keitetään vettä höyryn tuottamiseksi, jolla puolestaan pyöritetään generaattorin turbiineita. (Averyt ym. 2011.) Arvioiden mukaan Yhdysvaltojen palvelinkeskukset kuluttivat 626 miljardia litraa vuonna 2014. Vuoteen 2020 mennessä luvun ennustettiin kasvavan 660 miljardiin litraan. (Shehabi ym. 2016.)

Kokonaisvedenkulutuksen minimoinnin lisäksi on mahdollista pienentää palvelinkeskusten vedenkäytön aiheuttamaa kuormitusta lokaaliin vesihuoltoverkostossa käyttämällä jäähdytysjärjestelmissä puhtaan juomaveden sijaan harmaata jätevettä (*eng. grey water*). Esimerkiksi Googlen Douglasin piirikunnan palvelinkeskus käyttää jäähdytykseen vedenpuhdistuslaitoksen poistovettä, joka puhdistetaan erillisessä laitoksessa ja siirretään sieltä palvelinkeskukseen (Google Sustainability 2012). Tämä pienentää vedenhuoltoverkoston kuormitusta, jonka hyödyt huomataan etenkin kuivuuden aikaan.

Uusien innovaatioiden potentiaalisuutta ei tule unohtaa. Microsoftin Natick-projekti upotti palvelimia säiliössä mereen keväällä 2018. Vesitiivis säiliö oli täytetty kuivalla typpikaasulla. Kokeilu kesti kaksi vuotta, jonka aikana servereiden toimintaa ja luotettavuutta testattiin ja valvottiin. Kokeilussa saatiin hyviä tuloksia. Palvelinten vikatiheyden havaittiin olevan vain kahdeksasosan maalla sijaitseviin palvelinten lukemaan verrattuna. Lisäksi energiankulutus on maltillista, sillä ympäröivä meri hoiti palvelinten jäähdytyksen. (Roach 2020.) Vaikkakin tulokset ovat lupaavia, on kuitenkin huomioitava kokonaisvaltainen ympäristövaikutus. Yksi tankillinen servereitä tuskin lämmittää merta merkittävästi edes pienellä alueella. Laajemman mittakaavan toiminnalla sen sijaan saattaa olla merkittäviä vaikutuksia sekä meren lämpötilaan että paikallisen ekosysteemiin.

4.1.4 Laitteiston uusimisen tarpeen arviointi

Kasvihuonekaasupäästöt luokitellaan seuraavasti (UK Government 2018): luokkaan 1 kuuluu suoranaisesti yrityksen toimista johtuvat paikan päällä syntyvät päästöt. Luokkaan 2 kuu-

luu epäsuorat päästöt liittyen ostettuun energiaan. Luokkaan 3 kuuluu kaikki muut yrityksen arvoketjun päästöt. Nämä päästöt johtuvat epäsuorasti yrityksen toiminnasta. Esimerkiksi palvelinkeskuksista puhuttaessa, IT-laitteiston hankinnat kuuluisivat luokkaan 3. Vain luokkien 1 ja 2 päästöjen raportointi on pakollista, luokkaan 3 kuuluvien päästöjen raportointi perustuu vapaaehtoisuuteen. On siis mahdollista, ja jopa todennäköistä, että palvelinkeskuksien todellinen hiilijalanjälki on ilmoitettua suurempi. Herääkin kysymys, milloin IT-laitteisto kannattaa uusia. Onko ekologisempaa pitää vanha, kenties tehottomampi laitteisto vai vaihtaa uuteen ja tehokkaampaan? Tähän kysymykseen kattavasti vastaaminen vaatii lisää tutkimusta.

5 Johtopäätökset

Ilmastonmuutokseen hillitsemisen vuoksi hiilineutraaliuteen pyrkiminen palvelinkeskuksissa on tärkeää niiden suurten ja yhä suurenevien ympäristövaikutusten vuoksi. Palvelinkeskusten kuormitus tulee kasvamaan tulevaisuudessa, mutta energiankulutus on silti mahdollista saada pidettyä kurissa. Energiankulutusta voidaan hillitä erilaisilla laitteisto- ja ohjelmistotason keinoilla. Tärkeimpiä laitteistotason keinoja ovat jäähdytyksen ja laitteiston työkuormituksen optimointi sekä työkuormattoman laitteiston sammutus. Sovellustasolla tehokkain keino energiankulutuksen minimointiin on virtualisointi, jonka avulla palvelinten tehokkuus voidaan moninkertaistaa. Keinojen yhteensovittaminen optimaalisten tulosten saavuttamiseksi ei kuitenkaan ole yksinkertaista ja vaatii resurssien hallinnalta joustavaa reagointikykyä palvelinkeskuksen senhetkiseen työkuorman mukaan. Palvelinkeskusten ympäristövaikutuksia voidaan energiankulutuksen minimoinnin lisäksi pienentää muun muassa uusiutuvasti tuotetun energian käytöllä, hukkalämmön hyödyntämisellä sekä vedenkäytön tehostamisella.

Lähteet

Ahmad, Faraz, ja T. N. Vijaykumar. 2010. "Joint Optimization of Idle and Cooling Power in Data Centers While Maintaining Response Time". 45 (3). <https://doi.org/10.1145/1735971.1736048>.

Andrae, Anders S. G., ja Tomas Edler. 2015. "On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030". *Challenges* 6 (1): 117–157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>.

ASHRAE Guidelines. 2012. *Applying 2011 ASHRAE data center guidelines to HP ProLiant-based facilities*. Tekninen raportti. Hewlett-Packard.

Averyt, Kristen, Annette Huber-Lee, Jordan Macknick, N. Madden, J. Rogers ja Stacy Tellinghuisen. 2011. *Freshwater Use by US Power Plants: A Report of the Energy and Water in a Warming World Initiative*.

Avgerinou, Maria, Paolo Bertoldi ja Luca Castellazzi. 2017. "Trends in data centre energy consumption under the european code of conduct for data centre energy efficiency". *Energies* 10 (10): 1470.

Balasoorya, Prasanna NLN, Santoso Wibowo ja Marilyn Wells. 2016. "Green cloud computing and economics of the cloud: Moving towards sustainable future". *GSTF Journal on Computing (JoC)* 5 (1): 15.

Berral, J. L., Í. Goiri, T. D. Nguyen, R. Gavaldá, J. Torres ja R. Bianchini. 2014. "Building Green Cloud Services at Low Cost", 449–460. <https://doi.org/10.1109/ICDCS.2014.53>.

BP. 2020. *Statistical Review of World Energy 2020 | 69th edition*. <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>. Haettu: 20.4.2021.

CEEDA. 2019. *Certification of Energy Efficiency for Data Centers*. <https://www.ceedacert.com/>. Haettu: 8.5.2021.

Citadel. n.d. *The Citadel Campus*. <https://www.switch.com/the-citadel/>. Haettu: 20.4.2021.

- Cole, David. 2011. *Data Center Energy Efficiency – Looking Beyond PUE*. Tekninen raportti. No Limits Software.
- Dayarathna, Miyuru, Yonggang Wen ja Rui Fan. 2016. “Data Center Energy Consumption Modeling: A Survey”. *IEEE Communications Surveys Tutorials* 18 (1): 732–794. <https://doi.org/10.1109/COMST.2015.2481183>.
- Ebrahimi, Khosrow, Gerard F. Jones ja Amy S. Fleischer. 2014. “A review of data center cooling technology, operating conditions and the corresponding low-grade waste heat recovery opportunities”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 31:622–638. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.007>.
- EIA-310. n.d. *Server Rack FAQ*. <https://www.server-racks.com/eia-310.html>. Haettu: 30.4.2021.
- Fan, Xiaobo, Wolf-Dietrich Weber ja Luiz Andre Barroso. 2007. “Power provisioning for a warehouse-sized computer”. *ACM SIGARCH computer architecture news* 35 (2): 13–23.
- GeSI. 2012. *GeSI SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future*. Tekninen raportti. GeSI (Global e-Sustainability Initiative).
- Google Data Centers. 2021. *Google Data Centers: Efficiency*. <https://www.google.com/about/datacenters/efficiency/>. Haettu: 28.4.2021.
- Google Hamina. n.d. *Google Data Centers: Hamina, Finland*. <https://www.google.com/about/datacenters/locations/hamina/>. Haettu: 1.5.2021.
- Google Sustainability. 2012. *Smart water use in Google’s Douglas County data center*. <https://www.youtube.com/watch?v=lJnlgM1yEU0>. Youtube-video. Haettu: 12.5.2021.
- Gyarmathy, Kaylie. 2020. *What You Should Know About Data Center Cooling Technologies*. <https://www.vxchnge.com/blog/data-center-cooling-technology>. Haettu: 2.5.2021.
- Helen. 2021. *Konesalien hukkalämmöstä hiilineutraalia kaukolämpöä: Telian datakeskus lämmittää helsinkiläisiä koteja*. <https://www.helen.fi/uutiset/2021/konesalien-hukkalammosta-hiilineutraalia-kaukolampoa>. Haettu: 12.5.2021.

ISO 30134-2. 2016. *Information technology — Data centres — Key performance indicators — Part 2: Power usage effectiveness (PUE)*. Standard. International Organization for Standardization.

Jing, Si-Yuan, Shahzad Ali, Kun She ja Yi Zhong. 2013. “State-of-the-art research study for green cloud computing”. *The Journal of Supercomputing* 65 (1): 445–468.

Judge, Peter. 2021. *European cloud providers pledge to go climate neutral by 2030*. <https://www.datacenterdynamics.com/en/analysis/european-cloud-providers-pledge-go-climate-neutral-2030/>. Haettu: 7.5.2021.

Koomey, Jonathan. 2011. “Growth in data center electricity use 2005 to 2010”. *A report by Analytical Press, completed at the request of The New York Times* 9 (2011): 161.

Liu, Jie, Feng Zhao, Xue Liu ja Wenbo He. 2009. “Challenges Towards Elastic Power Management in Internet Data Centers”. Teoksessa *2009 29th IEEE International Conference on Distributed Computing Systems Workshops*, 65–72. <https://doi.org/10.1109/ICDCSW.2009.44>.

Mahadevan, Priya, Puneet Sharma, Sujata Banerjee ja Parthasarathy Ranganathan. 2009. “Energy Aware Network Operations”. Teoksessa *IEEE INFOCOM Workshops 2009*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/INFCOMW.2009.5072138>.

Masanet, Eric, Arman Shehabi, Nuo Lei, Sarah Smith ja Jonathan Koomey. 2020. “Recalibrating global data center energy-use estimates”. *American Association for the Advancement of Science* 367 (6481). <https://science.sciencemag.org/content/367/6481/984>.

Motochi, Vincent, Samuel Barasa, Patrick Owoche ja Franklin Wabwoba. 2017. “The role of virtualization towards green computing and environmental sustainability”. *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology (IJARCET)* 6 (6): 851–858.

Nivos. 2019. *Nivos: Kaukolämpöä Yandexin datakeskuksen hukkalämmöstä*. <https://energiat.ehokkuussopimukset2017-2025.fi/nivos-kaukolampoa-yandexin-datakeskuksen-hukkalammosta/>. Haettu: 8.5.2021.

- Pinheiro, Eduardo, Wolf-Dietrich Weber ja Luiz André Barroso. 2007. "Failure trends in a large disk drive population".
- Radu, Laura-Diana. 2017. "Green Cloud Computing: A Literature Survey". *Symmetry* 9 (12). <https://www.mdpi.com/2073-8994/9/12/295>.
- Red Hat. n.d. *What is virtualization?* <https://www.redhat.com/en/topics/virtualization/what-is-virtualization>. Haettu: 16.5.2021.
- Ritchie, Hannah. 2020. *Our World in Data: Electricity Mix*. <https://ourworldindata.org/electricity-mix>. Haettu: 20.4.2021.
- Roach, John. 2020. *Microsoft finds underwater datacenters are reliable, practical and use energy sustainably*. <https://news.microsoft.com/innovation-stories/project-natick-underwater-datacenter/>. Haettu: 14.5.2021.
- Shehabi, Arman, Sarah Smith, Dale Sartor, Richard Brown, Magnus Herrlin, Jonathan Koomey, Eric Masanet, Nathaniel Horner, Inês Azevedo ja William Lintner. 2016. "United states data center energy usage report".
- The Green Grid. 2021. *The Green Grid: About Us*. <https://www.thegreengrid.org/en/about-us>. Haettu: 8.5.2021.
- Tilastokeskus. 2019. *Energian kokonaiskulutus kasvoi 2 prosenttia vuonna 2018*. https://www.stat.fi/til/ehk/2018/04/ehk_2018_04_2019-03-28_tie_001_fi.html. Haettu: 1.5.2021.
- UK Government. 2018. *Streamlined Energy & Carbon Reporting: Government Response*. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/729586/SECR_Govt_response_Final__1_.pdf. Haettu: 14.4.2021.
- United Nations. n.d. *International Decade for Action 'Water for Life' 2005–2015*. <https://www.un.org/waterforlifedecade/scarcity.shtml>. Haettu: 7.5.2021.
- Valtioneuvosto. 2019. *Pääministeri Sanna Marinin hallituksen ohjelma 10.12.2019: Osallistava ja osaava Suomi – sosiaalisesti, taloudellisesti ja ekologisesti kestävä yhteiskunta*. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-287-808-3>. Haettu: 29.5.2021.

Villa, Herb. 2020. *Liquid Cooling vs. Immersion Cooling Deployment*. <https://blog.rittal.us/liquid-cooling-vs-immersion-cooling-deployment>. Haettu: 2.5.2021.